碳中和愿景下的能源变革

黄 震* 谢晓敏

上海交通大学 碳中和发展研究院 上海 200240

摘要 气候变化是当今人类面临的重大挑战之一，已成为全球性的非传统安全问题，严重威胁着人类的生存和可持续发展。我国碳达峰、碳中和承诺的提出，对我国建设人与自然和谐共生的社会主义现代化强国具有重要战略意义。面对我国如期实现碳达峰、碳中和的挑战，文章提出通过能源变革，大力推进能源供给侧的电力脱碳与零碳化、燃料零碳化，以及能源需求侧的能源利用高效化、再电气化和智慧化，构建以新能源为主体，“化石能源+二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）”和核能为保障的未来清洁零碳、安全高效能源体系。

关键词 碳中和，能源变革，电力零碳化，燃料零碳化

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20210812001

气候变化是当今全球面临的重大挑战之一。自第一次工业革命以来，煤、石油、天然气等化石能源的发现和利用极大提高了劳动生产率，推动了人类社会大繁荣、大发展，同时也产生了严重的环境问题和气候变化问题。200 多年来，化石能源燃烧所产生的二氧化碳（CO_2）累计已达 2.2 万亿吨，全球大气中 CO_2浓度持续上升。特别是近半个多世纪来，CO_2 浓度呈现快速增长的趋势（图 1），2021 年 4 月大气中 CO_2 的体积分数已达到了 419×10^{-6}①，全球地表平均温度已升高 1.1℃。2018 年联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布《全球升温 1.5℃ 特别报告》[1]，报告指出已经观察到的全球气温升高的事实，以及气温升高给人类造成的影响远远高于早期预测，2℃ 温升给世界造成的影响将难以承受，人类必须把温升控制在 1.5℃。以 CO_2 为主的温室气体排放所导致的全球气候变暖，已成为全球性的非传统安全问题，严重威胁着人类的生存和可持续发展。

为了对全球生态文明和构建人类命运共同体作出中国贡献，2020年9月国家主席习近平在第 75 届联合国大会上郑重宣布，中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和②。我国碳达峰、碳中和承诺的提出，不仅彰显了我国作为世

*通信作者

修改稿收到日期：2021年9月4日

① https://keelingcurve.ucsd.edu/.

② http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm.

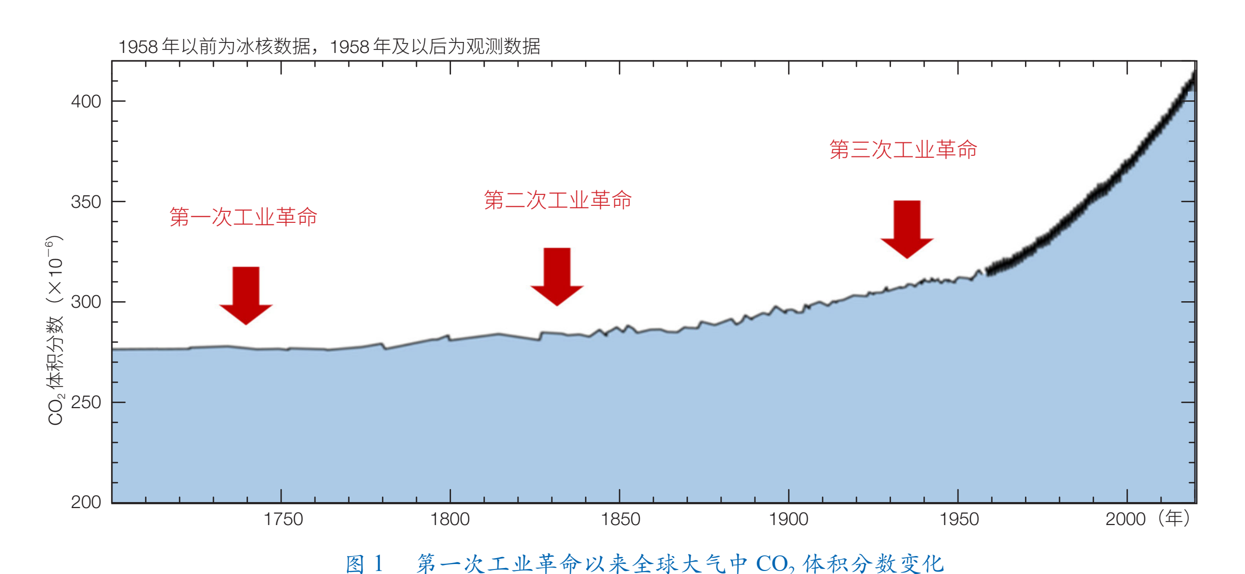


图 1　第一次工业革命以来全球大气中 CO_2 体积分数变化

Figure 1　Trends in atmospheric CO_2 since the first Industrial Revolution

数据来源：斯克利普斯海洋研究所（https://keelingcurve.ucsd.edu/）

Data source: Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego

界大国的责任担当，也是推动我国能源结构、产业结构、经济结构转型升级的自身发展需要，对我国实现高质量发展，建设人与自然和谐共生的社会主义现代化强国具有重要战略意义。

1 我国实现碳达峰、碳中和目标面临的挑战

改革开放 40 余年来，我国经济高速发展，2019 年我国的国内生产总值（GDP）总量超过 14 万亿美元，居全球第 2 位；但人均 GDP 刚突破 1 万美元，排在全球 67 位（图 2）。作为世界最大的发展中国家，我国的发展不平衡不充分问题仍然突出，面临着发展经济、改善民生等一系列艰巨任务；我国能源需求还在不断增加，碳排放仍处于上升阶段，尚未达到峰值。*在经济社会发展的同时，如何转变能源结构、产业结构、经济结构，实现碳达峰、碳中和，这是第一大挑战。*

从能源消费总量来看，2020 年我国能源消费总量世界第一，占比超过全球总量的 1/4，CO_2 排放占全球总量的 1/3[2]。从能源消费结构来看（图 3），我国仍以化石能源消费为主，2020 年占比超过 84%[2]；我国能源消费仍有一半以上的来源是煤炭，远高于全球能源消费结构中的煤炭占比。从我国发电类型来看，2020 年全国总发电量中 68% 来自于火电[3]。根据我国不同行业碳排放数据来看（图 4），发电与热力（占比 51%）和工业（占比 28%）是我国来源最大的 2 个碳排放行业③。从碳达峰时间看，20 世纪 90 年代之前欧盟主要国家已实现碳达峰，美国也于 2007 年实现碳达峰。欧盟主要国家提出 2050 年实现碳中和，从实现碳达峰到碳中和有 60 年以上时间；而我国因起步较晚，要实现碳达峰（2030 年）到碳中和（2060 年）的目标，时间只有欧盟主要国家的一半不到。这意味着，*我国需要用更短的时间，将占比达 84% 的化石能源转变成净零碳排放能源体系，时间紧、任务重，这是第二大挑战。*

从气候变化和温室气体控制的社会层面看，我国在百姓意愿、企业认同、技术储备、市场机制、法律法

③ https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=CHINAREG&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector.

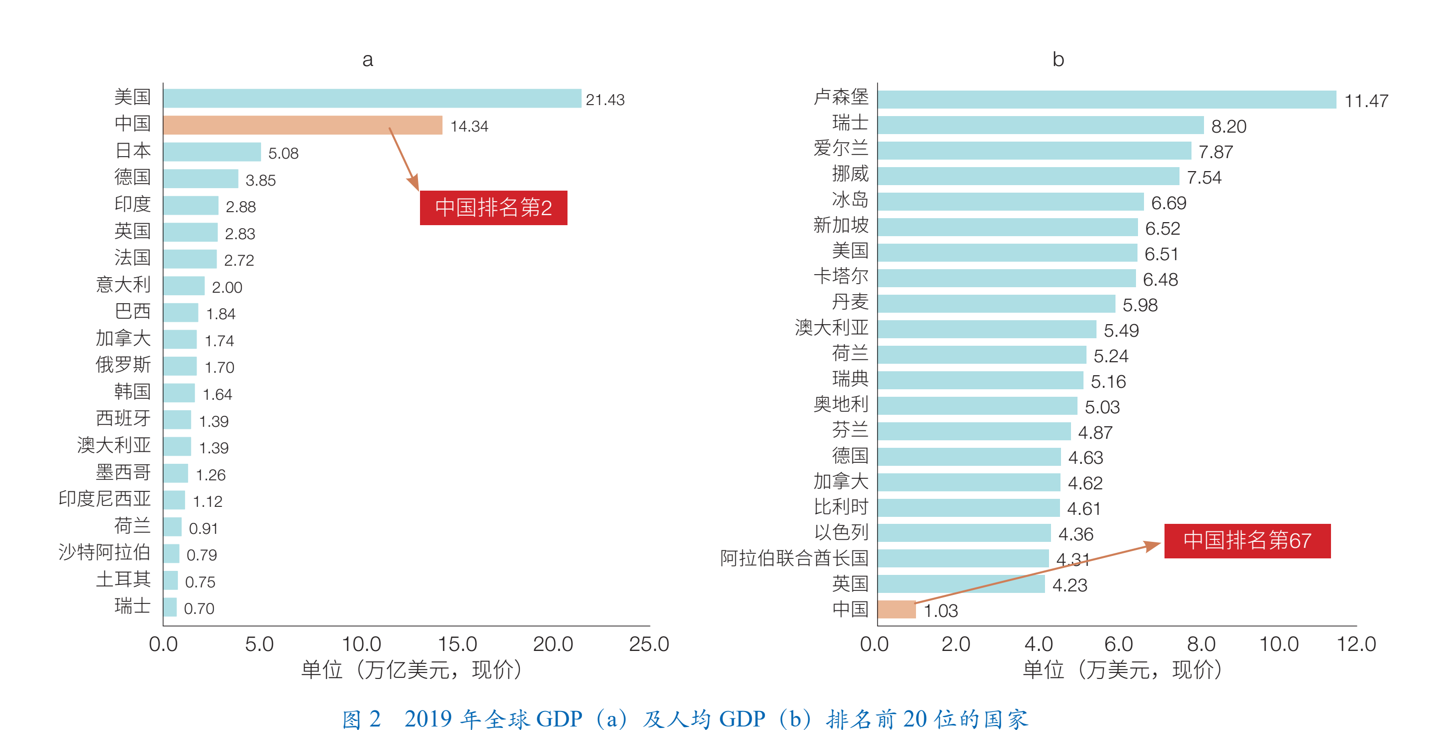


图 2　2019 年全球 GDP（a）及人均 GDP（b）排名前 20 位的国家

Figure 2　Global GDP (a) and GDP per capita (b) rankings in 2019 : Top 20 countries in the world

数据来源：世界银行（https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD）

Data source: The World Bank

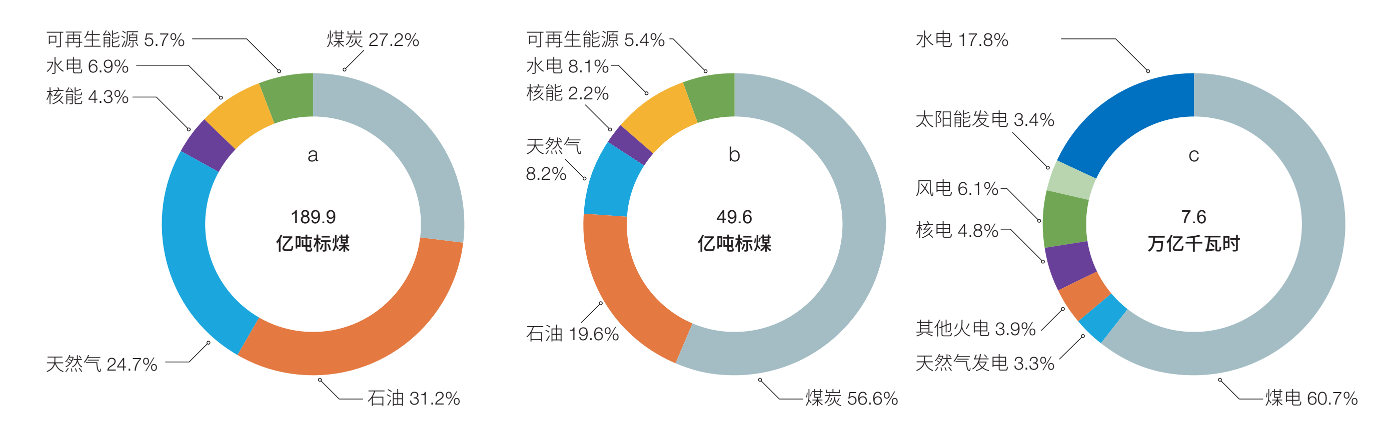


图 3　2020 年全球能源消费结构（a），以及中国的能源消费结构（b）和电力结构（c）

Figure 3　Global energy consumption (a), and China’s energy consumption, (b) and power generation (c) by type in 2020

数据来源：英国石油公司[2]、中国电力企业联合会[3]

Data source: BP[2], China Electricity Council[3]

规等方面与发达国家相比，明显滞后。例如：自《京都议定书》生效后，世界主要国家及地区纷纷建立区域内的碳交易体系，以实现碳减排承诺的目标；2005—2015 年，已建成遍布四大洲的 17 个碳交易体系，而 2021 年 7 月我国全国碳排放权交易才正式上线。我国碳交易体系亟待迎头赶上，这是第三大挑战。

为应对上述挑战，我国必须加速推进面向碳达峰、碳中和的经济社会系统性变革，进行能源革命，在能源供给、能源消费、能源技术和能源体制等方面实现新突破和新跨越。

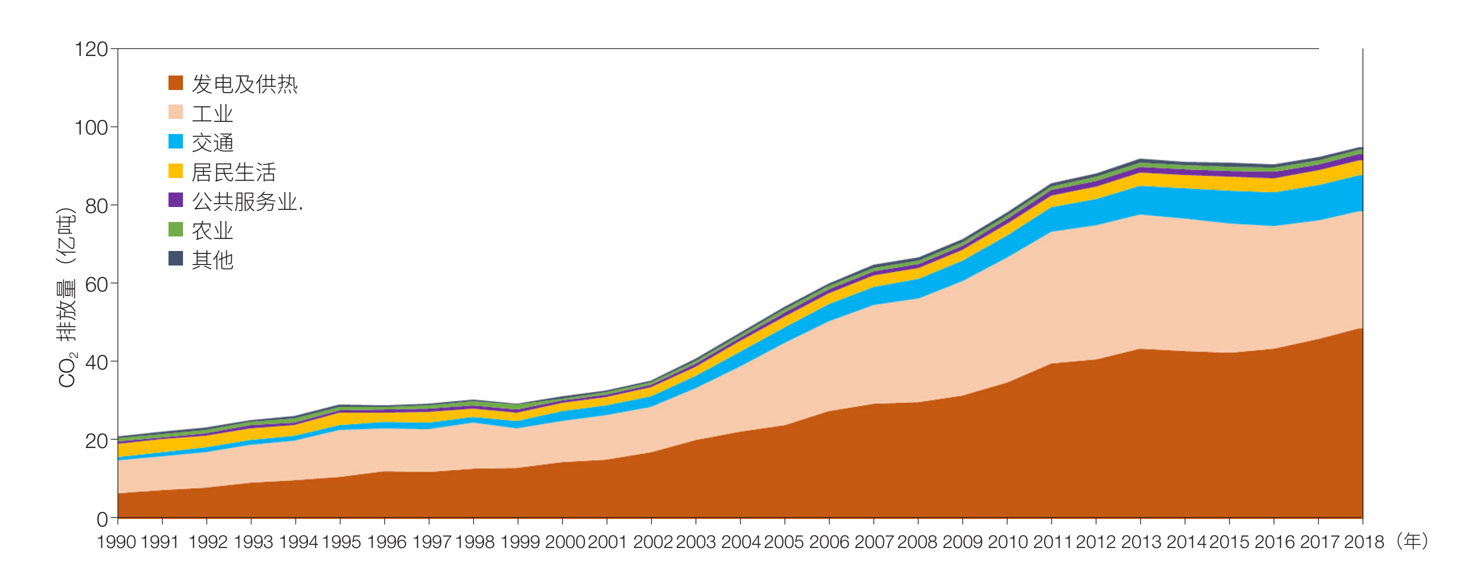


图 4　1990—2018 年我国不同行业碳排放

Figure 4　China's carbon emissions by sector from 1990 to 2018

数据来源：国际能源署（https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=CHINAREG&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector）

Data source: IEA

2 碳中和愿景下的能源变革

碳中和是一场绿色革命，将构建全新的零碳产业体系——如果没有颠覆性、变革性技术突破，不可能实现碳中和。未来能源变革将呈现“五化”：从能源供给侧看，是电力零碳化、燃料零碳化；从能源需求侧看，能源利用高效化、再电气化、智慧化（图 5）。最终使我国建成以新能源为主体，“化石能源+二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）”和核能为保障的未来清洁零碳、安全高效能源体系。

2.1 从能源供给侧看未来能源变革

2.1.1 电力零碳化

目前全球高达 41% 的碳排放来自于电力行业，我国更是高达 51% 碳排放来自于发电和热力⑤，电力脱碳与零碳化是实现碳中和目标的关键。

（1）要实现电力脱碳与零碳化，首先要大力发展可再生能源发电。近 10 年来，我国可再生能源实现跨越式发展，可再生能源开发利用规模稳居世界第一。2020 年我国可再生能源发电量占比全社会用电量 29.5%，总发电量达到 2.2 万亿千瓦时④；截至当年年底，我国可再生能源发电装机占比总装机 42.4%，总规模已达到 9.3 亿千瓦（图 6）。可再生能源发电成本也在不断下降，全球光伏发电成本在过去 10 年（2010—2020 年）下降了 85% 左右[4]。2021 年 6 月国家电力投资集团公司在四川甘孜州正斗一期 20 万千瓦光伏项目上报出 0.1476 元/千瓦时低价，创下中国光伏电站项目最低价纪录⑤。据预测，我国风电和光伏装机到 2030 年可达 16 亿—18 亿千瓦，2050 年将超过 50 亿千瓦[5]。

（2）要实现电力脱碳与零碳化，核心是构建以新能源为主体的新型电力系统。高比例新能源和海量负荷的双重随机性与波动性，给电网功率平衡和安全运

④ http://www.nea.gov.cn/2021-03/30/c_139846095.htm.

⑤ https://guangfu.bjx.com.cn/news/20210622/1159464.shtml.

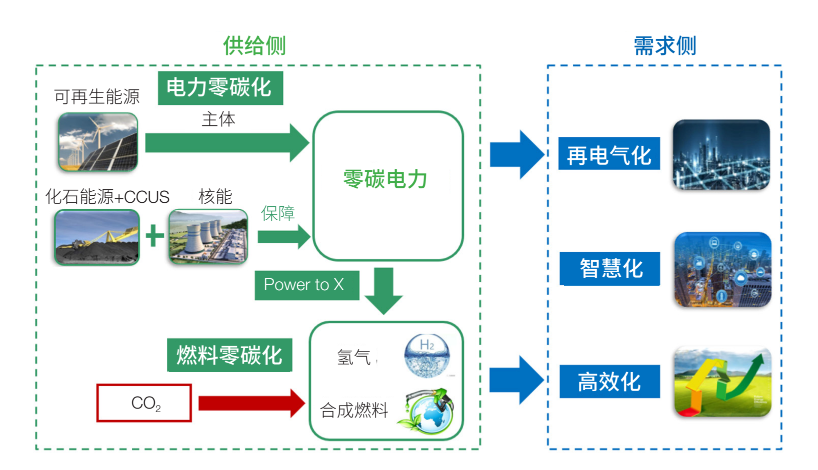


图 5　面向碳中和的能源变革

Figure 5　Energy revolution towards carbon neutrality

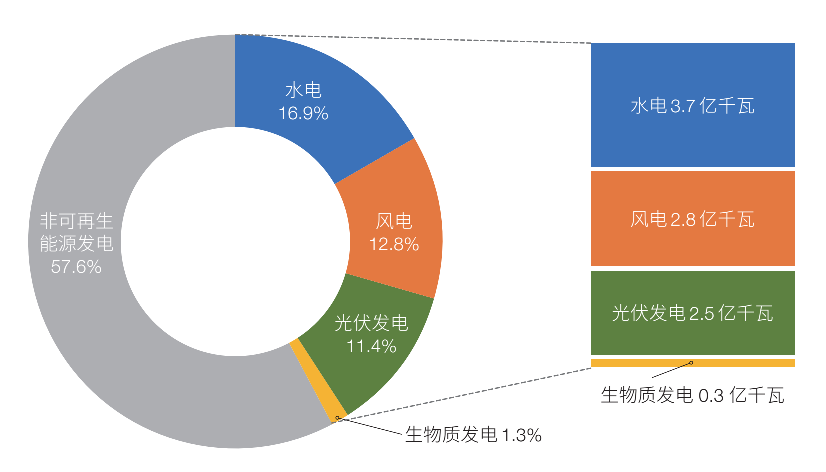


图 6　截至 2020 年底我国分类型发电装机容量

Figure 6　China's installed power generation by type, as end of 2020

数据来源：国家能源局（http://www.nea.gov.cn/2021-03/30/c_139846095.htm）

Data Source: National Energy Administration

行带来了很大挑战，亟须变革“源随荷动”的传统电力供给模式，提高电力系统灵活性。要重点突破区域电力系统“源网荷储”的深度互动与调控方法，提升电力电子化电力系统韧性、进行基于大数据电力供给和需求的预测与管理、建立电力分散自治互信交易机制。要深化电力体制改革，创新电力市场机制和商业模式。依赖遍布全国的分布式光伏发电和风电，将每一个建筑物转化为微型发电厂，大力发展虚拟电厂、智能微电网和储能技术，部署更多的新能源装机容量，发出与消纳更多的新能源电量，使常规火力发电从现在的基荷电力转变为调峰电力，实现电力脱碳与零碳化。构建以新能源为主体的新型电力系统是一项重大变革，德国的经验值得借鉴。德国先后宣布 2022 年弃核和 2038 年弃煤，2050 年构建全部 100% 采用可再生能源的用能体系⑥。德国在推进可再生能源发展中立法先行，建立起遍布全国的分布式光伏发电、风电、生物质发电及储能机组；通过基于大数据的电力供给侧和需求侧的预测与管理，以及基于互联网的电力交易和服务平台，有效促进可再生能源消纳，提高电网的供需平衡。在德国，高比例的可再生能源已使常规火电从基荷电力转变为调峰电力，成功实现了能源结构转型。

（3）要实现电力脱碳与零碳化，化石能源发电可通过 CCUS 实现净零碳排放。CCUS 是目前实现大规模化石能源零碳排放利用的关键技术，结合 CCUS 的火电将平衡可再生能源发电的波动性，提供保障性电力和电网灵活性。“新能源发电+储能”与“火电+CCUS”将是不可或缺的技术组合，它们间的深度协同将成为未来清洁零碳、安全高效能源体系的关键。根据国际能源署（IEA）研究结果，可持续发展情景下，2045 年前全球将淘汰所有非碳捕获与封存（CCS）煤电机组，将有 1 000 太瓦时的电力由煤电结合 CCS 技术生产[6]。因此，要加大 CCUS 技术研发投入，降低成本及能耗：研发新型吸收剂、吸附剂和膜分离材料，针对碳捕集、分离、运输、利用、封存及监测等各个环节开展核心技术攻关；

⑥ https://www.bundesregierung.de/breg-en/issues/climate-action/lower-co2-emissions-1795844.

要尽快建立CCUS标准体系及管理制度、CCUS碳排放交易体系、财税激励政策、碳金融生态，推动火电机组百万吨级 CO_2 捕集与利用技术应用示范，实现CCUS市场化、商业化应用。

2.1.2 燃料零碳化

燃料零碳化是以太阳能、风能等可再生能源为主要能量制取可再生燃料，包括氢、氨和合成燃料等。基于零碳电力的可再生燃料制取（图7），将创建一种全新的"源-储-荷"离线可再生能源利用形式，有望使交通和工业燃料独立于化石能源，实现燃料净零碳排放。可再生燃料是一项极具潜力的变革性技术，可为国家能源战略转型与碳中和目标实现提供全新的解决方案。

可再生合成燃料是利用可再生能源通过电催化、光催化、热催化等转化还原 CO_2，以合成碳氢燃料或醇醚燃料，具有能量密度高、输运和加注方便、可利用目前加油站等基础设施、社会应用成本低等优点。诺贝尔化学奖得主乔治·安德鲁·欧拉（George Andrew Olah）等[7]于2006年在著作《跨越油气时代：甲醇经济》中提出了利用可再生能源将工业排放及自然界的 CO_2 转化为碳中性醇醚燃料的观点。2018年施春风、张涛、李静海、白春礼4位院士[8]联合在 *Joule* 发文提出，如果人类想要获取、储存及供给太阳能，关键就在于如何将其转化为稳定、可储存、高能量的化学燃料，"液态阳光"将可能成就未来世界。近年来，通过可再生能源来转化 CO_2 制备合成燃料技术引起了世界主要发达国家和地区的高度关注。冰岛碳循环国际公司（Carbon Recycling International）在冰岛建成了世界上第一座基于 CO_2 循环利用的商业化甲醇工厂，通过地热发电，电解水制氢气（H_2），进一步与 CO_2 合成可再生甲醇；2014年该公司甲醇产能达到4 000吨⑦。2020年10月中国科学院大连化学物理研究所李灿院士团队千吨级"液态阳光"燃料合成示范项目在兰州成功运行⑧。欧盟启动Energy-X项目，以 CO_2 为介质来探究碳基能源的循环利用；美国能源部成立"液态阳光联盟"（Liquid Sunlight Alliance，LiSA），聚焦 CO_2 光/电还原液体燃料；上海交通大学成立了可再生合成燃料研究中心，目标是研发基于零碳电力的可再生合成燃料系统。牛津大学Hepburn等[9]在 *Nature* 上发文预测到2050年全球将有42亿吨 CO_2 被转化为合成燃料。

要真正实现通过阳光、水、CO_2 获取可再生合成燃料，亟待开展可再生合成燃料的基础理论和关键技术研究。针对 CO_2 还原转化产物，基于燃料与动力装置相互作用及调控机制，进行可再生合成燃料设计；从分子水平上建立催化剂构效关系，实现高效 CO_2 还原催化剂体系的设计与功能化定制；进而构建高能效的 CO_2 还原合成燃料系统，实现 CO_2 到液体燃料分子的高选择性转化和可再生燃料的合成。

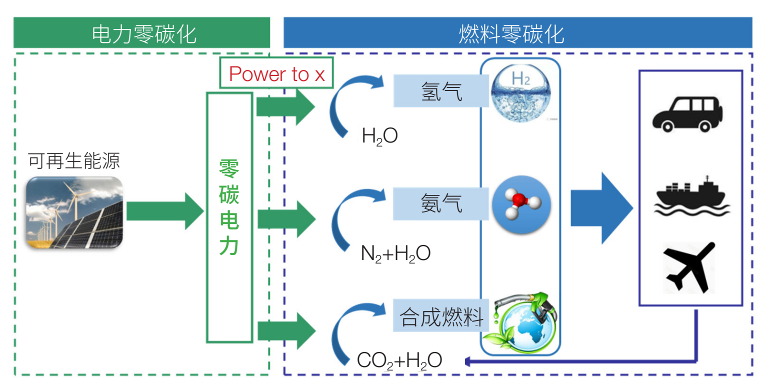


图7　基于零碳电力的可再生燃料制取

Figure 7　Renewable fuel production based on zero-carbon electricity

2.2 从能源需求侧看未来能源变革

在能源需求侧，要加快实现能源利用的高效化、再电气化和智慧化。

2.2.1 高效化

能源利用高效化、节能减碳是碳达

⑦ CO_2 制甲醇能否破解煤化工碳排放难题？亚化咨询，2016。

⑧ https://www.cas.cn/cg/cgzhld/202101/t20210112_4774334.shtml.

峰、碳中和最基础的重要工作。2012年以来我国单位GDP能耗累计降低24.4%，明显高于全球平均降速；但是，值得注意的是2019年我国单位GDP能耗仍高于全球平均水平50%，是英国、日本的3倍左右[2]，节能减碳潜力可观。我国要加大节能、节水、节材、减碳等先进技术研发和推广力度，全面推进电力、工业、交通、建筑等重点领域节能减碳；加快对电力、钢铁、石化化工、有色金属、建材等高耗能、高碳排放行业企业，以及交通运输车辆设备和公共建筑，实施节能和减碳技术改造，以降低单位GDP能耗和碳排放强度。

2.2.2 再电气化

再电气化是指在传统电气化基础上，实现基于零碳电力的高度电气化；未来碳中和社会的能源一定是围绕零碳电力展开的。2018年全球电气化水平即电能占终端能源消费的比重仅为19%，我国为25.5%[10]，预计2050年全球电气化水平将高于50%[11]。在加速零碳电力供给的基础上，加快工业、建筑、交通等领域的再电气化，这是提高能源利用效率、实现能源利用脱碳和零碳的重要途径。

2.2.3 智慧化

智慧化是通过互联网、物联网、人工智能、大数据、云技术等信息与控制技术，将人、能源设备及系统、能源服务互联互通，使电源、电网、负荷和能源存储深度协同，实现能源流与信息流的高度融合。把多种多样的分布式发电源和海量的负荷通过网络构架起来，给每个单元赋予智能，实现能源生产、交易、利用的高效化，以及能源基础设施的共享，这是提高能源利用效率、最大限度就地消纳可再生能源的重要手段。区块链技术使数据或信息具有“全程留痕”“可以追溯”“公开透明”“集体维护”等特征，将改变能源系统生产和交易模式，实现点对点新能源生产、交易、基础设施共享。例如，未来人们通过手机应用程序（APP）就能方便地把自家屋顶多余的光伏电卖给附近需要给电动汽车充电的陌生人，这种点对点的交易系统使能源系统中各节点成为独立的产消者。

2.3 能源发展大趋势

面向碳中和的能源发展大趋势是通过能源变革，大力推进能源供给侧的电力脱碳与零碳化、燃料零碳化，以及能源需求侧的能源利用高效化、再电气化和智慧化。化石能源尤其是煤炭将转变为保障性能源，通过CCUS实现化石能源净零碳排放，同时稳步发展核电；在此基础上，构建以新能源为主体、“化石能源+CCUS”和核能为保障的未来清洁零碳、安全高效能源体系。

在能源生产形式上，将从现有电力系统自顶向下的树状结构（发电—输电—配电—用电）走向扁平化、大量分布式能源自治单元之间相互对等互联的结构。这种能源互联使可再生能源分层接入与消纳得以实现，构建以新能源为主体的新型电力系统。

在能源生产和消费的主体上，将从能源生产者、消费者互相独立转变为能源产销者一体。随着分布式能源系统和智能微网、局域网技术的日益成熟及电动汽车普及，电网中分散电源和有源负荷将不断增长，每一个建筑物转化为微型发电厂，原本需求侧的用户将扮演消费者和生产者的双重角色，成为独立的能源产消者。

在能源结构上，化石能源从主体能源逐步转变为保障性能源，在一次能源消费中的占比将大幅降低，可再生能源从补充能源变为主体能源，比例会持续大幅度提高。能源利用从高碳走向低碳，最后走向零碳能源的时代，这种变化将是革命性和颠覆性的。

3 结论

（1）碳中和愿景下的能源变革包括供给侧的电力零碳化、燃料零碳化，以及需求侧的能源利用高效化、再电气化、智慧化。电力脱碳与零碳化是实现碳中和目标的关键和重中之重，碳中和社会的能源一定

是围绕零碳电力展开的。要尽最大努力，提高非碳基电力发展速度和供给能力，构建以新能源为主体的新型电力系统。

（2）面向碳中和，化石能源尤其是煤炭将转变为我国的保障性能源。CCUS 是目前实现大规模化石能源零碳排放利用的关键技术，结合 CCUS 的火电将推动电力系统净零排放，平衡可再生能源发电的波动性，提供保障性电力和电网灵活性。“新能源发电+储能”与“火电+CCUS”将是不可或缺的技术组合，这些将构成以新能源为主体、“化石能源+CCUS”和核能为保障的未来清洁零碳、安全高效能源体系。

（3）碳达峰是量变，碳中和是质变，仅通过碳达峰的量变走不到碳中和的质变。如果没有能源变革、没有经济社会系统性社会变革、没有一场绿色革命，不可能实现碳中和。面向碳中和的未来能源，其核心是由一系列颠覆性、变革性能源技术作为战略支撑，形成的全新能源体系。

（4）实现“双碳”目标特别是碳中和与经济社会发展不是对立关系，不是“赛道超车”而是“换赛道”，是重新定义人类社会的资源利用方式，是挑战更是机遇！碳中和将引领构建全新的零碳产业体系，人类将从基于自然禀赋的能源开发利用，走向基于技术创新的新能源开发利用。谁在零碳技术创新占据领先，谁就是“新赛道”上的“领跑者”，谁就有可能引领下一轮产业革命。

（5）面向碳中和的能源变革，绝不仅是一个能源问题、一个环境问题，而是一个全局性、系统性问题；不是一蹴而就的，而是要循序而进，先立后破。能源变革的路径需要基于技术、市场和政策法规等多层面进行科学设计与决策。

参考文献

1 Intergovernmental Panel on Climate Change. Global Warming of 1.5℃. Geneva: IPCC, 2018.

2 BP. BP Statistical Review of World Energy 2021. London: BP, 2021.

3 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2021. 北京: 中国建材工业出版社, 2021.

4 International Renewable Energy Agency. Renewable Power Generation Costs in 2020. Abu Dhabi: IRENA, 2021.

5 全球能源互联网发展合作组织. 中国2030年能源电力发展规划研究及2060年展望. 北京: 全球能源互联网发展合作组织, 2021.

6 International Energy Agency. Energy Technology Perspectives 2020. Paris: IEA, 2020.

7 Olah G A, Goeppert A, Prakash Go K S. 跨越油气时代：甲醇经济. 胡金波, 译. 北京: 化学工业出版社, 2007.

8 Shi C F, Zhang T, Li J, et al. Powering the future with Liquid Sunshine. Joule, 2018, 2(10): 1925-1949.

9 Hepburn C, Adlen E, Beddington J, et al. The technological and economic prospects for CO_2 utilization and removal. Nature, 2019, 575: 87-97.

10 中国电力企业联合会. 中国电气化发展报告2019. 北京: 中国建材工业出版社, 2019.

11 BP. BP Energy Outlook: 2020 edition. London: BP, 2020.

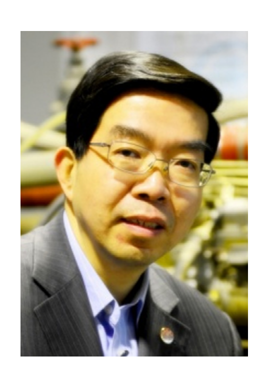
Energy Revolution under Vision of Carbon Neutrality

HUANG Zhen* XIE Xiaomin

(Research Institute of Carbon Neutrality, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Climate change has emerged as one of the major challenges faced by mankind. It has become a non-traditional global security issue, which causes a serious threat to the survival of human being and sustainable development. China's commitment to peak carbon emissions by 2030 and achieve carbon neutrality by 2060 has important strategic significance for building a modern socialist country with harmonious coexistence between human and nature. Facing the challenge of China's carbon peak and carbon neutrality, this study proposes, through energy revolution, to promote electric decarbonization and zero carbonization power and zero carbonization fuel on the energy supply side, and to enhance energy utilization efficiency, re-electrification, and intelligence on the energy demand side. Thus, a clean, zero-carbon, safe and efficient energy system will be established with new energy as the main body and fossil energy plus carbon capture, utilization, and storage (CCUS) and nuclear energy as the guarantee.

Keywords carbon neutrality, energy revolution, zero carbonization power, zero carbonization fuel



黄 震 中国工程院院士。上海交通大学讲席教授。中国民主促进会中央委员会副主席，十三届全国政协常委，国际燃烧学会Fellow。主要从事新能源动力、燃烧和大气污染防治、能源政策与战略研究。发表学术著作3部、论文300余篇，获国家自然科学奖二等奖1项、国家技术发明奖二等奖1项。*Frontiers in Energy* 执行主编，*Energy Science & Engineering* 和 *International Journal of Engine Research* 编委。E-mail: z-huang@sjtu.edu.cn

HUANG Zhen Academician of Chinese Academy of Engineering, Chair Professor of Shanghai Jiao Tong University; Fellow of The Combustion Institute; Vice President of the Central Committee of the China Association for Promotion of Democracy, Member of the Standing Committee of the 13th CPPCC National Committee. His research work focuses on new energy and powertrain technology, combustion and air pollution control, and energy policy and strategy. He has published more than 300 papers in scientific journals and 3 academic works, and won the second prize of National Natural Science Award and the second prize of State Technological Invention Award. He also serves as Executive Editor-in-Chief of *Frontier in Energy*, and editorial board member of *Energy Science & Engineering* and *International Journal of Engine Research*.
E-mail: z-huang@sjtu.edu.cn

■责任编辑：张帆

*Corresponding author